



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Instituto de Ciência e Tecnologia  
Câmpus de Sorocaba

BARBARA KOHLRAUSCH ROGERIO

**DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA: DESAFIOS E CAMINHOS PARA A  
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO**

Sorocaba

2026

BARBARA KOHLRAUSCH ROGERIO

**DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA: DESAFIOS E CAMINHOS PARA A  
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto  
de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em  
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cesar Germano  
Martins

Coorientador: Me. Arthur Cortez Pires de Campos

Sorocaba

2026

R723d

Rogério, Barbara Kohlrausch

Diversificação da matriz elétrica : desafios e caminhos para a transição energética no Brasil e no mundo. / Barbara Kohlrausch Rogério. -- Sorocaba, 2026  
36 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba  
Orientador: Antonio Cesar Germano Martins  
Coorientador: Arthur Cortez Pires de Campos

1. Mudanças climáticas. 2. Fatores climáticos. 3. Energia. I. Título.

BARBARA KOHLRAUSCH ROGERIO

**Diversificação da matriz elétrica:  
desafios e caminhos para a transição energética no Brasil e no mundo.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 10/02/2026

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 10 de Fevereiro de 2026.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional durante todo o processo de elaboração deste trabalho, do início ao fim. Sem a compreensão, incentivo e carinho de vocês, este percurso seria muito mais difícil. Ao meu orientador, expresso minha profunda gratidão por estar presente em diversas etapas da minha graduação, especialmente na escolha do meu caminho profissional na área de energia. É uma grande satisfação concluir este ciclo ao seu lado. Ao meu coorientador, agradeço pelo suporte e pelas contribuições valiosas durante a construção deste trabalho, que foram fundamentais para o seu desenvolvimento. Por fim, à Universidade Estadual Paulista (UNESP), manifesto meu reconhecimento pelo apoio e pelas oportunidades oferecidas ao longo da minha formação acadêmica, que foram essenciais para meu crescimento pessoal e profissional.

## **RESUMO**

Este trabalho realiza um estudo aprofundado das principais formas de geração de energia elétrica na atualidade, com enfoque especial nos desafios enfrentados por fontes renováveis, no que diz respeito às suas intermitências, e por fontes não renováveis, no que diz respeito às suas adaptações em um futuro mais limpo e sustentável. Inicialmente, é apresentada uma breve introdução sobre a relevância do uso global de energias renováveis para mitigação da crise energética mundial e redução dos impactos ambientais. Ao compreender as características das fontes de geração de energias renováveis e não renováveis, o trabalho destaca o cenário brasileiro, que ocupa posição de destaque mundial para liderar a transição energética, devido à sua matriz diversificada e potencial hídrico e solar. Apresenta, ainda, os mecanismos utilizados pelo Brasil frente às intermitências das renováveis e à adaptabilidade das fontes fósseis, incluindo políticas públicas e investimentos em tecnologia. Por fim, são exploradas diversas tecnologias inovadoras que estão sendo estudadas e aperfeiçoadas para ambas as frentes da transição energética, visando a diversificação e modernização da matriz elétrica brasileira e mundial, garantindo segurança, eficiência e sustentabilidade.

Palavras-chave: Transição energética; Energias renováveis; Intermitência; Adaptabilidade climática; Justiça climática

## **ABSTRACT**

This paper seeks to present an in-depth study of the main forms of electricity generation nowadays, with a special focus on the challenges faced by renewable sources regarding their intermittency, and by non-renewable sources concerning their adaptation to a cleaner and more sustainable future. Initially, a brief introduction is presented on the relevance of global renewable energy use for mitigating the worldwide energy crisis and reducing environmental impacts. By understanding the characteristics of renewable and non-renewable energy sources, the study highlights Brazil's position as a global leader in the energy transition, thanks to its diversified matrix and significant hydro and solar potential. It also addresses the mechanisms adopted by Brazil to cope with renewable intermittency and the adaptability of fossil sources, including public policies and technological investments. Finally, it explores various innovative technologies currently being researched and improved for both fronts of the energy transition, aiming at the diversification and modernization of the Brazilian and global electricity matrix, ensuring security, efficiency, and sustainability.

Keywords: Energy transition; Renewables; Intermittency; Climate adaptability; Climate justice;

## SUMÁRIO

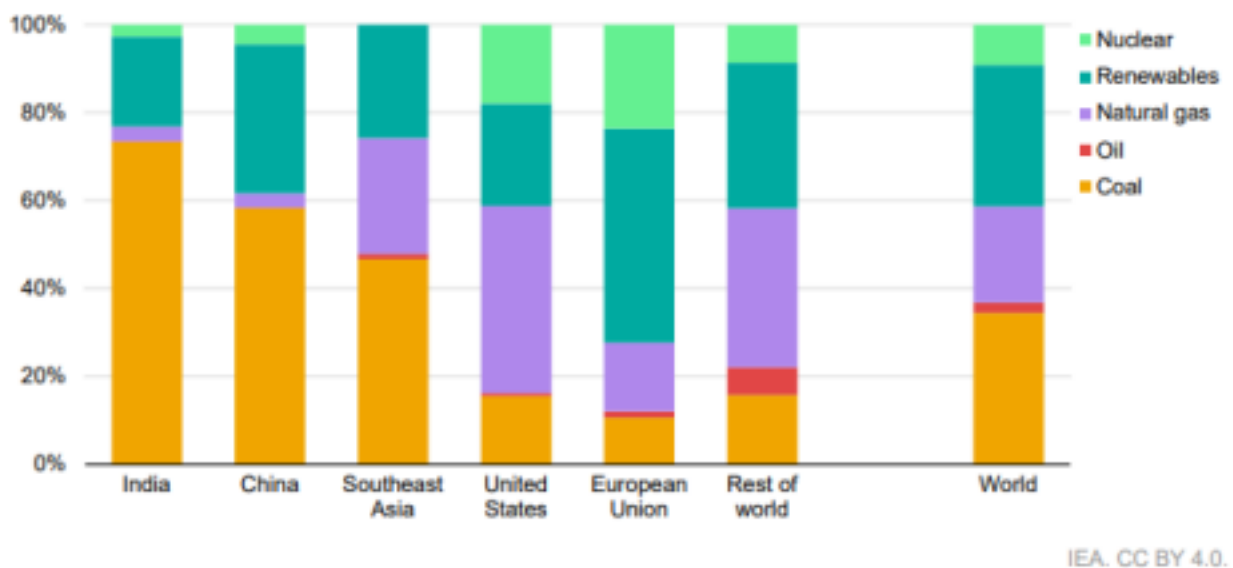
|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>                                                                         | <b>9</b>  |
| 2.1. Objetivos Gerais.....                                                                       | 9         |
| 2.2. Objetivos Específicos.....                                                                  | 9         |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>                                                                       | <b>9</b>  |
| <b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                             | <b>11</b> |
| 4.1. O uso de fontes fósseis.....                                                                | 11        |
| 4.2. O uso de fontes renováveis.....                                                             | 12        |
| 4.2.1. Energia Hidrelétrica.....                                                                 | 12        |
| 4.2.2. Energia Solar.....                                                                        | 13        |
| 4.2.3. Energia Eólica.....                                                                       | 13        |
| 4.2.4. Energia da biomassa.....                                                                  | 15        |
| 4.3. Comparativo entre energias renováveis e gás natural.....                                    | 15        |
| 4.4. Comparativo entre energias renováveis e nuclear.....                                        | 16        |
| 4.5. Oportunidades brasileiras.....                                                              | 17        |
| 4.5.1. O Sistema Interligado Nacional (SIN).....                                                 | 18        |
| 4.5.2. Principais órgãos e documentos envolvidos no planejamento nacional.....                   | 20        |
| 4.5.3. A segurança energética e diminuição da dependência fóssil nacional.....                   | 22        |
| 4.5.4. Formas de adaptação às intermitências em território brasileiro.....                       | 22        |
| 4.5.5. A diminuição da dependência nacional por fontes hidroelétricas.....                       | 23        |
| 4.6. Soluções em estudo para a Transição Energética.....                                         | 24        |
| 4.6.1. Baterias.....                                                                             | 24        |
| 4.6.2. Hidrogênio (H <sub>2</sub> ).....                                                         | 25        |
| 4.6.3. Smart grids.....                                                                          | 26        |
| 4.6.4. Perdas no sistema.....                                                                    | 27        |
| 4.6.5. Projetos de Captura de Carbono.....                                                       | 28        |
| <b>5. DISCUSSÕES.....</b>                                                                        | <b>29</b> |
| 5.1. Fatores históricos e cenário atual da geração de energia.....                               | 30        |
| 5.2. Fatores associados ao futuro da transição energética, com ênfase no cenário brasileiro..... | 31        |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>                                                                         | <b>32</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                           | <b>33</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo de 2024, a demanda global por eletricidade aumentou em 4,3%, conforme estimativas da Agência Internacional de Energia (IEA) em seu mais recente relatório “Electricity 2025: Analysis and forecast to 2027”. O relatório publicado em fevereiro de 2025 mostra que é esperado que o consumo global por eletricidade aumente em um ritmo mais acelerado que nos últimos anos, no período de 2025-2027, impulsionado principalmente pelo crescimento industrial, necessidade por refrigeração e por acelerar a eletrificação, e expansão e crescimento dos data centers e da inteligência artificial. Também é previsto no relatório que este número continue em crescimento ano após ano.

Sabe-se que, de todos os setores que contribuem com o aquecimento global através de suas emissões de gases do efeito estufa (GHG), o maior contribuinte é o setor de energia e, em especial, o setor de geração de energia elétrica. Atualmente, bem mais que a metade da energia elétrica gerada mundialmente provém de fontes fósseis, isto é, em suma carvão, petróleo e gás natural, que são não renováveis e altamente poluentes. A Figura 1 ilustra o cenário da geração de energia elétrica no mundo, em 2024, onde aproximadamente 70% das fontes são fósseis e prejudiciais ao meio ambiente.

Figura 1: Fontes de geração de eletricidade por região (2024)



Fontes: Global Energy Review (IEA, 2025)

Essa dependência por fontes fósseis contribui para uma crescente emissão de gases tóxicos, como o dióxido de carbono. Em 2023, houve um aumento de 410 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas, ou 1,1%, em comparação ao ano anterior. Apesar desse aumento, as emissões de CO<sub>2</sub> no setor de energia cresceram menos intensamente em 2023, graças à adoção de tecnologias de energia limpa, cenário que se repetiu no ano de 2024, segundo o Global Energy Review. Sem essas tecnologias, é estimado que o aumento de CO<sub>2</sub> teria sido três vezes maior nos últimos cinco anos.

As mudanças climáticas estão diretamente ligadas à emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), como o dióxido de carbono. A emergência climática é hoje um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade, impulsionada pelo dilema da energia, que busca garantir um futuro sustentável, seguro e confiável, enquanto se pretende limitar as emissões das fontes elétricas.

A Transição Energética é uma solução promissora para esta crise. Como o próprio nome diz, a “transição de energia” diz respeito a migração do uso de fontes fósseis e não renováveis (como o diesel, gasolina e gás natural) para fontes limpas e renováveis (como a solar, eólica, biomassa, etc), a fim de minimizar as emissões GEE .

Embora possa parecer simples, a transição de fontes fósseis, que são confiáveis e consolidadas, para fontes renováveis, como a solar e a eólica, que dependem de condições climáticas para serem eficientes, apresenta desafios significativos. A intermitência dessas fontes, aliada à falta de tecnologias adequadas para garantir um abastecimento rápido em situações de emergência, compromete sua estabilidade. Portanto, é essencial que a transição energética assegure, simultaneamente, a diminuição nas emissões de GEE e a segurança energética da população.

Desta forma, o presente trabalho busca realizar uma análise das principais fontes de geração de energia, destacando aquelas mais promissoras para o futuro da transição energética. Além disso, aborda os desafios enfrentados pelas fontes renováveis, como a intermitência, e os obstáculos que as fontes fósseis precisam superar para se tornarem mais sustentáveis, reduzindo seus impactos ambientais, especialmente relacionados às emissões GEE.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

Com o desenvolvimento deste trabalho, busca-se realizar uma análise do panorama energético global e nacional, com o intuito de compreender as principais fontes de geração elétrica atualmente em uso, bem como os direcionamentos estratégicos para o futuro do setor. Além disso, pretende-se contribuir para o corpo teórico existente por meio de uma reflexão crítica sobre as iniciativas relacionadas às energias renováveis no setor elétrico, abordando tanto as oportunidades quanto os obstáculos que se impõem à concretização desta transição.

### **2.2. Objetivos Específicos**

A fim de atender o objetivo geral, os objetivos específicos foram estipulados:

- Análise do panorama histórico mundial e brasileiro de geração de energia;
- Estudo do cenário energético atual brasileiro;
- Estudo e análise do planejamento elétrico futuro do Brasil;
- Análise das principais soluções em estudo para complementar as fontes fósseis e renováveis, garantindo segurança e estabilidade energética.

## **3. METODOLOGIA**

O presente estudo busca abordar os principais desafios enfrentados no estabelecimento de uma transição energética robusta, destacando as principais soluções que já foram implementadas ou que estão sendo estudadas para tratar os problemas encontrados.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram seguidas as seguintes etapas: a primeira consistiu no levantamento do histórico do uso de fontes fósseis e a implementação das fontes renováveis no grid mundial, e na formulação do problema a nível global. Na segunda o foco foi de realizar comparações entre a eficácia das fontes fósseis consideradas promissoras para o futuro da transição energética versus o uso das fontes renováveis. No terceiro abordou-se o processo de geração de energia elétrica no Brasil, bem como o funcionamento do

planejamento energético e elétrico nacional. O foco esteve em evidenciar as estratégias adotadas pelo país para se adaptar às exigências da transição energética, considerando os desafios e oportunidades desse cenário. No quarto apresentou-se as principais soluções que vêm sendo estudadas como oportunidades para garantir a estabilidade e segurança energética, que asseguram também um futuro menos poluente. Por fim, o último tópico concentrou-se na síntese das principais ideias desenvolvidas ao longo deste trabalho, considerando de forma crítica e integrada a análise das ferramentas de estudos selecionadas para embasar a discussão.

O portal de dados utilizado para a consecução destes estudos foi o Google Acadêmico. Para a seleção dos artigos utilizados neste trabalho, foi adotada uma abordagem qualitativa com base na relevância temática e na credibilidade das fontes. A busca foi realizada utilizando palavras-chave relacionadas aos temas de interesse de cada capítulo, como “gás natural”, “transição energética e energias renováveis”, “planejamento energético no Brasil”, “armazenamento de energia a partir de baterias” e “projetos de captura de carbono”.

Selecionaram-se os seguintes artigos científicos e acadêmicos, relatórios oficiais e planos institucionais relacionados ao tema da transição energética, com as finalidades apresentadas a seguir:

- Artigo ***“O papel do gás natural na transição energética” (UFRJ, 2022)***: fundamentação sobre o gás natural como combustível de transição.
- Artigo ***“Análise Técnica de um Sistema de Armazenamento de Energia Elétrica produzida por fontes renováveis utilizando sistemas de baterias e células a combustível a hidrogênio” (UNICAMP, 2019)***: apoio à discussão sobre intermitência das renováveis e soluções como baterias e hidrogênio.
- Artigo ***“A Transição Para Energias Renováveis: Impactos Econômicos e Ambientais da Implementação de Tecnologias Sustentáveis” (IOSR Journal, 2025)***: contribuição com reflexões sobre intermitência e o papel das redes inteligentes (smart grids).
- Artigo ***“O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor” (Revista Brasileira de Energia, 2021)***: base conceitual para discutir o histórico do planejamento nacional de energia e o uso de fontes fósseis associadas a tecnologias de baixo carbono como alternativas complementares às energias renováveis;
- Relatórios da IEA – ***Global Energy Review (IEA, 2024)*** e ***Electricity 2025 (IEA, 2024)***: utilizados para contextualizar o cenário energético mundial atual. - Relatórios da EPE – ***Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034)***: referência para

compreender o planejamento energético nacional.

- Artigo “*Remover carbono da atmosfera pode ajudar a conter o aquecimento global*” (FAPESP, 2024): fundamentação sobre as tecnologias de captura de carbono existentes e aplicações no Brasil.

Esses textos foram utilizados como referências na elaboração da Fundamentação Teórica a ser apresentada a seguir.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. O uso de fontes fósseis

A Primeira Revolução Industrial, ocorrida entre 1760 e 1840, foi um período marcado por inovações tecnológicas e econômicas significativas, além do início do uso intensivo de combustíveis fósseis, como o carvão mineral. Esse primeiro "boom" tecnológico trouxe uma série de comodidades e transformações na vida cotidiana, incluindo o aumento da produção em massa, melhorias no transporte e a urbanização da população. Embora tenha sido essencial para o desenvolvimento global, as transformações iniciadas na Primeira Revolução Industrial também deram início às emissões de gases de efeito estufa (GEE) no meio ambiente.

Durante a Primeira Revolução Industrial, o carvão foi a principal fonte de energia, alimentando máquinas a vapor essenciais para a indústria têxtil, transporte ferroviário e outras indústrias da época. No final do século XIX, com o início do uso do petróleo devido ao desenvolvimento de tecnologias para sua extração e refino, trouxe avanços no setor energético, alimentando motores de combustão interna e aumentando a eficiência e a produtividade. Entretanto, apesar dos avanços significativos, esse período marcou o início de uma série de impactos ambientais em cadeia, com destaque para o aumento dos GEE na atmosfera.

Na década de 1960, os movimentos ambientalistas começaram a ganhar força, impulsionados por publicações influentes, como “Silent Spring” (1962, de Rachel Carson), que alertou sobre os perigos dos pesticidas e a degradação ambiental. A Crise do Petróleo de 1973 intensificou essa conscientização, levando à pesquisa de alternativas para atender à crescente demanda por energia e estimulando o desenvolvimento de fontes de energia renováveis.

A Conferência de Estocolmo, em 1972, e o Protocolo de Quioto, em 1997, foram marcos importantes que colocaram as questões ambientais no centro do debate político global, reconhecendo a necessidade urgente de limitar o uso de combustíveis fósseis para combater as mudanças climáticas. Desde 2001, os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) têm fornecido evidências robustas sobre a relação entre as mudanças climáticas e o uso de combustíveis fósseis, aumentando a urgência de ações para reduzir as emissões a cada ano.

Foi somente em 2015, com a adoção do Acordo de Paris, que a comunidade internacional estabeleceu pela primeira vez um compromisso global para enfrentar as mudanças climáticas. O principal objetivo foi limitar o aumento da temperatura média do planeta a menos de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C. Esse marco impulsionou a transição energética, acelerando a busca por fontes de energia mais limpas e renováveis, e reforçando a urgência de ações sustentáveis em escala mundial.

## **4.2. O uso de fontes renováveis**

As fontes de energia renováveis são classificadas como limpas, uma vez que emitem significativamente menos gases de efeito estufa em comparação com as fontes fósseis. Além disso, essas fontes são consideradas inesgotáveis, pois se renovam continuamente através de processos naturais, garantindo a sua disponibilidade a longo prazo.

Diante da ampla diversidade de fontes de energia renovável disponíveis, o contexto brasileiro se destaca por apresentar elevado potencial em quatro principais modalidades: energia solar, energia hidrelétrica, energia eólica e energia proveniente da biomassa. Essas fontes, apesar de apresentarem benefícios em termos ambientais, também possuem desafios associados à sua integração na matriz energética nacional, especialmente em termos econômicos e no cenário de eficiência energética.

### **4.2.1. Energia Hidrelétrica**

A energia gerada a partir do aproveitamento das águas dos rios é conhecida como energia hidrelétrica, hidráulica ou hídrica. Nas usinas hidrelétricas, a movimentação das águas converte a energia potencial da água em energia cinética das turbinas, que, por sua vez, é transformada em energia elétrica, devido à Lei de Faraday (HALLIDAY, D; RESNICK, R;

WALKER, J., 2016). Atualmente, essa é a fonte de energia elétrica mais utilizada no Brasil, representando mais de 50% da matriz nacional.

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o país é dividido em doze Regiões Hidrográficas (isto é, bacias, grupo de bacias e sub-bacias hidrográficas) com características naturais, sociais e econômicas. Este fato evidencia a potencialidade e a força desta fonte para geração de energia no país.

Embora a energia hidráulica seja altamente eficiente e de fácil utilização, um dos principais desafios associados a essa fonte é a variação na disponibilidade de água ao longo do ano, que depende das chuvas na região da usina e nas cabeceiras dos rios. Durante períodos de seca intensa, regiões que dependem exclusivamente dessa fonte de eletricidade podem enfrentar longos períodos de racionamento e falta de energia.

#### **4.2.2. Energia Solar**

Além da energia hidráulica, outra fonte muito conhecida é a energia proveniente do Sol. A chamada energia solar é considerada uma fonte inesgotável, que pode ser aproveitada tanto na forma de calor (gerando energia térmica) quanto na forma de eletricidade.

A energia elétrica solar pode ser obtida através da radiação solar incidindo diretamente sobre os painéis fotovoltaicos ou indiretamente em usinas heliotérmicas, através do aproveitamento do calor da radiação solar. O primeiro método é mais comum devido à praticidade de instalar painéis fotovoltaicos em residências, edifícios, estabelecimentos comerciais e outras áreas.

Apesar de promissora, essa fonte de energia apresenta alguns desafios. Um dos principais pontos de atenção é o custo das placas solares e o elevado investimento inicial necessário para sua instalação. Além disso, a intermitência dessa fonte pode ser problemática, uma vez que sua geração depende exclusivamente da luz solar. Em dias nublados e chuvosos, a produção de energia pode ser significativamente reduzida e a noite não está disponível, impactando a confiabilidade do sistema.

#### **4.2.3. Energia Eólica**

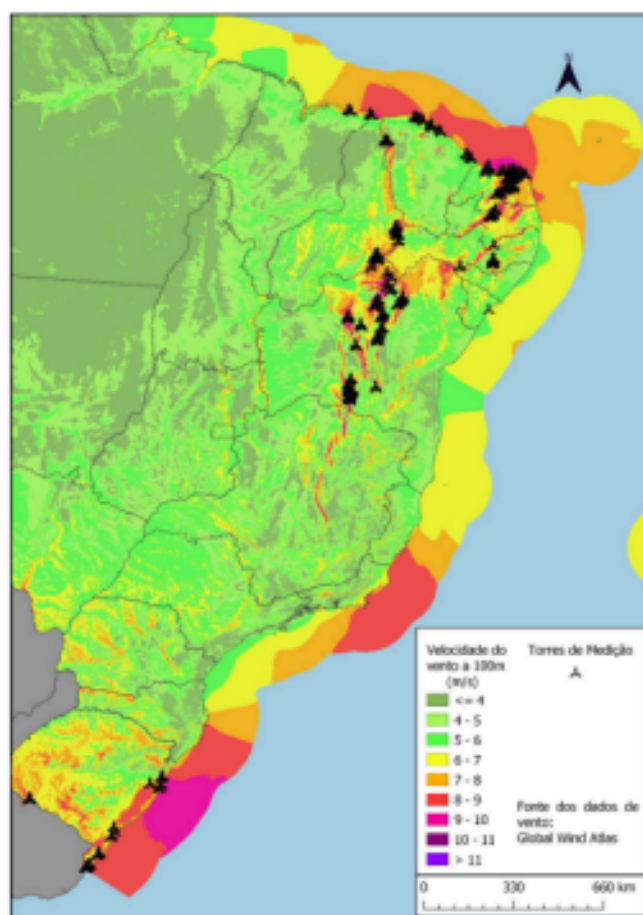
A chamada energia eólica é obtida através do aproveitamento dos movimentos das massas de ar locais. Utilizam-se aerogeradores, que possuem imensas hélices que giram conforme a quantidade de vento no local. Essas hélices acionam um gerador que transforma a energia cinética do vento em energia elétrica, devido ao mesmo princípio das turbinas em

hidrelétricas.

Essa é uma das fontes mais limpas, devido à sua baixa taxa de poluição atmosférica e poucos impactos ambientais significativos quando comparada a outras fontes de energia. No entanto, assim como a energia solar, essa fonte é intermitente e só pode ser aproveitada em momentos e regiões com ventos suficientes. Além disso, exige uma grande área para a instalação dos "parques eólicos".

A Figura 2 apresenta a velocidade média atual do vento a 100m de altura no país. A partir desta imagem, é possível verificar que o Brasil possui diversas regiões com grande potencial para a instalação de parques eólicos, devido à alta velocidade e intensidade das massas de ar ventos nessas áreas, uma vez que ventos com velocidades iguais ou maiores a 6m/s são apropriados para a geração de energia elétrica.

Figura 2: Torres de medição e velocidade dos ventos a 100m



Fonte: EPE (2024)

#### 4.2.4. Energia da biomassa

Por fim, a energia gerada a partir da queima de biomassa, que inclui matéria orgânica e vegetal, apresenta-se como uma alternativa viável. Em países com uma forte presença do agronegócio, como o Brasil, essa fonte de energia se torna especialmente atrativa, pois produz menos emissões de gases de efeito estufa em comparação à queima de combustíveis fósseis, além do sequestro do carbono no ciclo produtivo das plantas. Destaca-se também que os resíduos gerados durante o processo da colheita no campo podem ser reaproveitados como matéria-prima para a queima, promovendo um modelo de economia circular nas usinas. Essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também maximiza a eficiência dos recursos disponíveis.

#### 4.3. Comparativo entre energias renováveis e gás natural

Ao discutir uma transição energética que seja segura, confiável e acessível para todos, é inevitável abordar o dilema entre o uso de fontes renováveis intermitentes e fontes fósseis menos poluentes, como o gás natural.

O gás natural é amplamente reconhecido como um combustível de transição por excelência, especialmente por sua versatilidade e menor emissão de poluentes em comparação com outras fontes fósseis. Sua aplicação abrange desde o setor elétrico até usos industriais e térmicos, com vantagens logísticas como facilidade de transporte e armazenamento.

De acordo com Lewenkopf (2021), o gás natural tem se destacado como uma alternativa estratégica para atuar como fonte de backup às energias renováveis intermitentes, como solar e eólica, contribuindo para a segurança energética e para a redução das emissões de carbono, especialmente na forma de CO<sub>2</sub>. Essa abordagem híbrida permite uma transição gradual e mais estável, conciliando confiabilidade operacional com metas ambientais.

Apesar de suas vantagens, o gás natural permanece uma fonte não renovável, com emissões de gases de efeito estufa (GEE) ainda presentes, embora em menor escala. Além disso, sua cadeia produtiva envolve riscos ambientais significativos, como vazamentos, explosões e impactos associados à extração e ao transporte. Lewenkopf (2021) afirma ainda que *existem muitas barreiras a serem transpassadas principalmente no elo do transporte e distribuição do gás natural no Brasil*. Neste cenário, para melhor atender a demanda de energia no país, será necessário um alto investimento em termos de infraestrutura do caminho do gás até os centros consumidores.,

Esses fatores evidenciam que, embora o gás natural possa desempenhar um papel relevante na transição energética, seu uso deve ser acompanhado de tecnologias de mitigação, regulação ambiental rigorosa e planejamento estratégico, de modo a minimizar seus efeitos negativos e garantir que sua função como combustível de transição não comprometa os objetivos de longo prazo de descarbonização.

#### **4.4. Comparativo entre energias renováveis e nuclear**

Existe ainda uma discussão no ramo ambiental entre o uso de fontes renováveis em comparação com as fontes nucleares.

Apesar de ser uma fonte de energia promissora, com alta eficiência energética, baixa emissão de poluentes durante sua operação e alta confiabilidade no fornecimento de energia, a energia nuclear exige um alto custo inicial, principalmente durante as fases de construção e descomissionamento das usinas, e também apresenta riscos no caso de acidentes, que podem ter consequências gravíssimas à população local e ao meio ambiente, além de gerar resíduos radioativos que precisam ser armazenados com segurança por milhares de anos, a fim de evitar contaminação do local.

Um dos casos mais famosos atrelados a acidentes nucleares diz respeito ao desastre de Chernobyl (Figura 3). Ocorrido em 26 de abril de 1986, foi um dos piores acidentes nucleares da história. A explosão e o incêndio em um dos reatores da usina nuclear liberou enormes quantidades de material radioativo na atmosfera, afetando gravemente o meio ambiente, além de matar pessoas não apenas durante a explosão, mas com o passar dos anos, devido à radioatividade local.

Figura 3: Desastre nuclear de Chernobyl



Fonte: CNN Brasil (2024)

Para o futuro da transição energética, é crucial aprender com os erros do passado e adotar uma abordagem equilibrada. A combinação de fontes renováveis e nucleares pode ser uma solução viável, desde que sejam implementadas com rigorosas medidas de segurança e regulamentações ambientais, que visem também minimizar os impactos ambientais da extração do Urânio. Investir em tecnologias de armazenamento de energia e em fontes de energia limpa e segura é essencial para garantir um futuro sustentável e minimizar os riscos ambientais.

#### **4.5. Oportunidades brasileiras**

As fontes fósseis apresentam, em geral, uma grande estabilidade e rápida resposta para a geração de energia, ao passo que as fontes renováveis apresentam uma solução limpa e de baixo impacto ao meio ambiente, porém intermitente, acarretando que seja difícil substituir uma fonte fóssil por uma renovável de forma a garantir a disponibilidade de energia para a população. Em decorrência disto, existe ainda uma grande dependência por fontes fósseis para o setor elétrico, conforme ilustrado na Figura 4.

A matriz elétrica brasileira, no entanto, apresenta um cenário diferente do mostrado na matriz elétrica mundial. Ao utilizar majoritariamente fontes renováveis e limpas na geração de energia elétrica, o país está em uma posição de destaque mundial (Figura 4).

Segundo a ANEEL (2024), é estimado que 84,25% da energia fornecida no grid

elétrico sejam provenientes de fontes renováveis, sendo as três maiores fontes: a Hídrica (55%), seguida da Eólica (14,8%) e Biomassa (8,4%). Ainda, a Figura 4 mostra que, desde o ano de 2004, a participação das quatro principais fontes renováveis (isto é, solar, eólica, biomassa e hidráulica) na matriz elétrica brasileira se manteve acima de 70%, conforme mostram as % por ano no gráfico da Figura 4. Este fato coloca o país em posição de destaque mundial para liderar a transição energética e guiar o mundo para um portfólio mais limpo, diverso e sustentável.

Figura 4: Participação das 4 principais fontes de renováveis na matriz elétrica brasileira, desde 2004.



Fonte: BEN (2024)

#### 4.5.1. O Sistema Interligado Nacional (SIN)

Devido à vasta dimensão territorial do Brasil e as diferentes condições climáticas observadas nas regiões do país, a geração e transmissão de energia foi desenvolvida com o objetivo de oferecer uma energia confiável para todas as regiões e oferecer uma estabilidade na rede elétrica nacional.

Desta forma, o SIN (Sistema Integrado Nacional) é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, que envolve uma complexa rede de linhas de transmissão interligadas entre si, variando a sua voltagem e potência ao longo do país, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5: SIN e as linhas de transmissão. Todos os pontos e triângulos em preto são, respectivamente, usinas e subestações em operação. Enquanto os pontos e triângulos em branco são, respectivamente, usinas e subestações planejadas. As cores das linhas indicam a potência de cada linha de transmissão, sendo a roxa escuro a de maior potência, com 750kv.



Fonte: ONS, SINMAPS (2025)

Devido a alta representatividade na matriz elétrica nacional, o SIN envolve majoritariamente usinas hidrelétricas. Além disso, o sistema também conta com usinas eólicas distribuídas principalmente na região Nordeste do país, devido à grande quantidade de ventos locais, e usinas termelétricas que desempenham um papel estratégico de garantir a segurança energética do SIN.

Apesar do mundo caminhar para uma matriz cada vez mais diversa e renovável, um ponto de atenção se dá ao notar a grande instabilidade que fontes de geração de energia limpas e renováveis podem vir a trazer. A chamada “intermitência” das renováveis tem ganhado cada vez mais espaço nas rodas de discussão sobre um futuro elétrico mais sustentável, uma vez que o Sol nem sempre está à vista e o vento nem sempre está presente. Em outras palavras, algumas fontes de energia dependem majoritariamente de condições climáticas geográficas favoráveis para garantir sua máxima eficiência energética.

Devido a sua grande importância, uma das maiores preocupações brasileiras é em usinas hidrelétricas em períodos de estiagem. Com a falta de chuvas e a consequente seca dos reservatórios, a geração hidrelétrica pode ser afetada e, devido à sua alta contribuição no SIN

total, acaba por afetar a transmissão de energia nacional, causando blecautes e apagões em nível nacional.

Um exemplo, é o blecaute ocorrido em março de 1999 em escala nacional, afetando 76 milhões de pessoas de 11 estados brasileiros e do Distrito Federal. O blecaute foi causado por uma falha em uma linha de transmissão que conectava a Usina Hidrelétrica de Itaipu ao restante do sistema elétrico brasileiro.

Vista a importância em ter um sistema seguro e confiável, serão discutidas as principais estratégias nacionais de geração de energia futura e como o Brasil se prepara para enfrentar uma transição energética segura, limpa e renovável e, principalmente, sustentável para todos.

#### **4.5.2. Principais órgãos e documentos envolvidos no planejamento nacional**

O Brasil possui uma vasta gama de instituições e órgãos públicos ligados ao planejamento e desenvolvimento energético nacional, que trabalham em conjunto para garantir uma energia confiável e acessível a todos. Neste trabalho, serão mencionadas majoritariamente 3 instituições principais: o Ministério de Minas e Energia (MME), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a fim de focar nos planos e visão estratégica do país para o setor elétrico.

De forma breve, o MME é o órgão do Governo Federal responsável por conduzir as políticas energéticas do País, ao passo que a ONS é responsável pelo sistema operacional, ou seja, é ele quem opera, supervisiona e controla a geração de energia elétrica no SIN e administrar a rede básica de transmissão de energia no Brasil. Por fim, a EPE é uma instituição vinculada ao MME cujo principal objetivo é realizar estudos e pesquisas e trazer inovações destinadas ao planejamento do setor energético brasileiro.

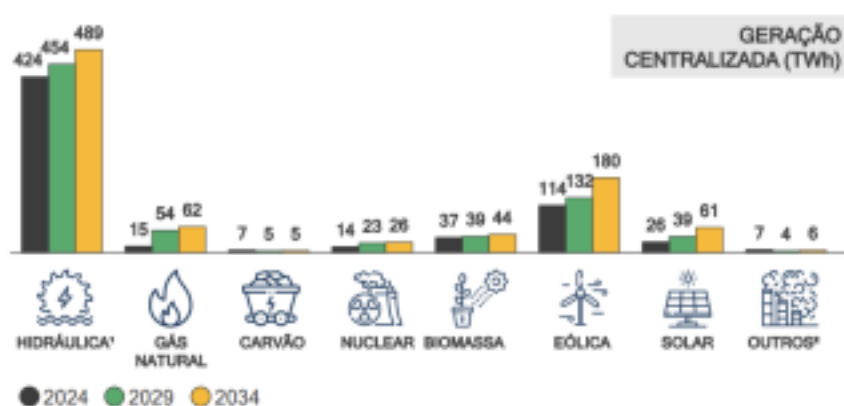
As análises energéticas realizadas pela EPE são publicadas em documentos técnicos que, nos casos dos planos de energia, os principais são o Plano Decenal de Energia (PDE) e o Plano Nacional de Energia (PNE). Ambos dizem respeito a planejamento futuros do setor de energia, mas o PDE tem como foco principal trazer projeções para os próximos 10 anos, enquanto o PNE apresenta perspectivas para períodos de médio e longo prazo.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2034 da EPE, o consumo de energia elétrica no Brasil deve continuar crescendo nos próximos anos, impulsionado pelo aumento da demanda residencial, industrial e comercial.

O PDE 2034 projeta um crescimento médio anual de 3,5% no consumo de energia elétrica até 2034, totalizando 774 TWh neste ano, com destaque para a expansão das fontes renováveis, como solar e eólica, que devem desempenhar um papel crucial na matriz energética do país. Essas projeções refletem a necessidade de investimentos contínuos em infraestrutura e tecnologia para garantir a segurança e a sustentabilidade do fornecimento de energia no Brasil.

O PDE 2034 apresenta uma previsão da geração de eletricidade no país, utilizando os anos de 2024, 2029 e 2034 como base. A Figura 6 mostra essa comparação.

Figura 6: Previsão da geração de eletricidade no Brasil, nos anos de 2024, 2029 e 2034



Fonte: PDE 2034 - Caderno Consolidação de Resultados (nov./2024)

A partir deste estudo é possível notar que a previsão é de que todas as fontes renováveis tenham um aumento, ao passo que as fontes provenientes de carvão caiam. O gás natural também cresce, porém em uma escala menor.

O setor elétrico brasileiro responde por uma parcela comparativamente baixa das emissões totais do país. No entanto, as mudanças climáticas podem impactar significativamente os hábitos de consumo de eletricidade, resultando por exemplo em um aumento da demanda de energia para resfriamento das residências (ar condicionado ou ventilador) ou em banhos mais frequentes devido ao calor.

Além disso, as mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade de recursos naturais, como água, ventos e radiação solar. Quanto maior o aquecimento global, mais frequentes serão os períodos de secas, aumentos de temperatura e eventos extremos em geral.

No sistema hídrico, é necessário avaliar possíveis mudanças estruturais no regime hidrológico e na disponibilidade de vazões para a geração hidrelétrica, o que pode explicar

uma leve queda na representação hídrica nacional. As indicações do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031 promovem medidas de mitigação e adaptação que aumentem a resiliência do setor de geração frente às possíveis secas, aumentos de temperatura e eventos extremos em geral.

#### **4.5.3. A segurança energética e diminuição da dependência fóssil nacional**

O ponto chave para um futuro de baixo carbono é a migração da matriz elétrica de fontes fósseis para uma diversificação das fontes renováveis de energia utilizadas em um país. O Brasil, como um país em posição de liderança na utilização de renováveis em sua matriz energética, têm como desafio garantir que a energia gerada por fontes renováveis seja estável e segura à todos, ao passo que é diminuída a sua dependência por fontes fósseis.

Frente a este cenário contrastante, o país tem se empenhado em diminuir a utilização de fontes fósseis ao avançar o uso de outras fontes renováveis, que não a hidrelétrica. Entretanto, devido a intermitência das fontes renováveis, que dependem do sol e do vento para serem geradas, é de suma importância que o país garanta a segurança energética à população. Para equilibrar a redução das fontes fósseis e o aumento das renováveis com a segurança no sistema, o Brasil adota estratégias como a diversificação da matriz, com o intuito de buscar explorar novas fontes renováveis de energia, e o investimento em tecnologias de armazenamento de energia, por meio de instrumentos como o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o Plano Nacional de Energia (PNE) e as diretrizes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Essas medidas visam explorar novas fontes renováveis e implementar soluções como baterias, contribuindo para mitigar os efeitos da intermitência das fontes renováveis e garantir a confiabilidade do sistema elétrico nacional. Além disso, destaca-se a utilização do gás natural como uma ponte energética de transição.

É relevante ressaltar também a importância em investir em infraestrutura e interconexões regionais, visando melhorias na distribuição de energia, integrando países vizinhos no fornecimento

#### **4.5.4. Formas de adaptação às intermitências em território brasileiro**

Sabe-se que as fontes renováveis mais promissoras, visto cenário climático brasileiro, são as fontes solar e eólica. Presentes majoritariamente nas regiões Norte e Centro-Oeste (alta

radiação solar) e Nordeste (grande regime de ventos locais), respectivamente, é possível que nos próximos anos o foco seja aumentar a quantidade de usinas solares e eólicas nestas regiões, interligando-as ao SIN.

Apesar deste cenário promissor, é insustentável olhar para a expansão das renováveis sem garantir que a intermitência delas seja levada em consideração ao aumentar seu uso. Algumas das formas mais palpáveis no momento para evitar este problema são: diversificar ao máximo a matriz renovável, manter as usinas termelétricas de gás natural e de biomassa como fontes secundárias utilizadas para garantir a seguridade energética e também explorar tecnologias de armazenamento de energia a serem utilizadas quando necessário.

Além das soluções abordadas acima, o país também tem investido em melhorias na previsibilidade da geração de energia, a fim de melhorar a capacidade de antecipar a produção de energia solar e eólica, ajudando os operadores do sistema a planejar melhor o uso de outras fontes de energia e garantir a estabilidade do fornecimento. A criação de “Redes Inteligentes” (as conhecidas “Smart Grids”) são estratégias importantes para lidar com a intermitência das renováveis, à medida que monitoram e gerenciam o fluxo de energia de maneira mais eficiente, ajustando-se em tempo real às flutuações na geração de energia renovável e na demanda. Além disso, permitem a integração de diferentes fontes de energia, incluindo as renováveis intermitentes, e ajudam a balancear a oferta e a demanda de maneira mais eficaz.

O Brasil está adotando uma abordagem multifacetada para lidar com a intermitência das energias renováveis, reconhecendo que é necessário equilibrar a expansão dessas fontes com a necessidade de garantir a segurança e a estabilidade do sistema elétrico. A estratégia inclui a complementaridade com a geração hidrelétrica, o armazenamento de energia, a diversificação das fontes renováveis, o uso de termelétricas a gás como reserva, e a melhoria da infraestrutura de transmissão e redes inteligentes.

#### **4.5.5. A diminuição da dependência nacional por fontes hidroelétricas**

O Brasil está buscando diminuir a dependência das hidrelétricas em seu sistema elétrico, reconhecendo que, embora essas usinas desempenhem um papel central na matriz energética nacional, há desafios associados à sua dominância, especialmente em termos de vulnerabilidade a variações climáticas e secas prolongadas. Essa transição envolve um esforço para diversificar as fontes de geração de energia e tornar o sistema mais resiliente e sustentável.

As principais abordagens e estratégias que o Brasil tem adotado para reduzir a dependência das hidrelétricas dizem respeito a expansão de outras renováveis e aumento da participação de gás natural, como já citado, e também o aumento em tecnologias de armazenamento de energia, através do uso de baterias.

#### **4.6. Soluções em estudo para a Transição Energética**

##### **4.6.1. Baterias**

Riedel (2021) afirma que, dentre as tecnologias de armazenamento em estudo para conter as intermitências, as baterias são consideradas métodos diretos de armazenamento de eletricidade.

As baterias são dispositivos eletroquímicos compostos por uma ou mais células, nas quais ocorre a movimentação de elétrons entre eletrodos — ânodo e cátodo — por meio de um eletrólito, permitindo as reações de oxidação e redução durante os ciclos de carga e descarga (BAKER, 2008; HADJIPASCHALIS; POULLIKKAS; EFTHIMIOU, 2009). No caso das baterias de íon de lítio, amplamente utilizadas em sistemas de armazenamento de energia, sua estrutura é formada por quatro componentes principais: ânodo (geralmente de grafite), cátodo (composto por óxidos metálicos como o de cobalto), eletrólito (responsável pela condução dos íons de lítio) e separador (que evita o contato direto entre os eletrodos, prevenindo curtos-circuitos). Essa configuração permite alta densidade energética e eficiência, sendo uma das tecnologias mais promissoras para mitigar os efeitos da intermitência das fontes renováveis.

Durante a carga, os íons de lítio se movem do cátodo para o ânodo através do eletrólito. Durante a descarga, o processo é invertido, com os íons se movendo do ânodo para o cátodo, gerando eletricidade. Esse processo de intercalação é eficiente e permite que as baterias de íon de lítio tenham alta densidade de energia e longa vida útil.

Já as baterias de fluxo armazenam energia em eletrólitos líquidos que circulam entre dois tanques separados. Esses eletrólitos são bombeados através de uma célula eletroquímica que contém um conjunto de eletrodos e uma membrana. Durante a carga, os eletrólitos são bombeados para a célula, onde ocorrem reações químicas que armazenam energia. Durante a descarga, o processo é invertido, liberando a energia armazenada.

Ainda segundo Riedel (2019), *as tecnologias de baterias eletroquímicas possuem em sua maioria alta eficiência, que varia de 75% a 95%, e um custo inicial de investimento de*

*300-3500 US\$ por quilowatt-hora (US\$ / kWh).* Ambas as tecnologias de armazenamento, baterias de íon-lítio e baterias de fluxo, são fundamentais para a integração de energias renováveis na matriz elétrica. As baterias de íon-lítio são ideais para aplicações que exigem alta densidade de energia e flexibilidade, enquanto as baterias de fluxo são mais adequadas para armazenamento de longa duração e grandes instalações. Juntas, essas tecnologias podem ajudar a superar os desafios da intermitência das fontes renováveis, garantindo um fornecimento de energia mais estável e sustentável.

#### **4.6.2. Hidrogênio (H<sub>2</sub>)**

Riedel (2019) acredita que, dentre as tecnologias de estudo de armazenamento visando a contenção da problemática das intermitências, uma que vem mostrando ter um grande potencial de aplicabilidade é o uso do hidrogênio como vetor energético, devido a sua flexibilidade de aplicação em praticamente todos os setores energéticos.

As principais formas em que o hidrogênio pode atuar para mitigar as intermitências das renováveis incluem seu uso como armazenamento de energia, geração de eletricidade e substituto de combustíveis fósseis. Uma das principais vantagens do H<sub>2</sub> é de armazenar energia. Isso pode ser interessante no cenário das intermitências, pois em períodos de excessos na geração de energia (de “sobra” de energia), esta pode ser utilizada para produzir hidrogênio, no processo conhecido como “power-to-gas”.

A partir disso, o hidrogênio pode ser armazenado por longos períodos e usado como uma forma de armazenamento de energia de longo prazo, o que é especialmente útil quando a produção renovável não corresponde à demanda (por exemplo, durante noites sem sol ou períodos sem vento). Isso ajuda a suavizar as flutuações da geração de energia renovável e a garantir a continuidade do fornecimento de energia.

Outra forma de utilizar o hidrogênio após a sua estocagem é a sua conversão de volta em eletricidade quando necessário, utilizando células de combustível a hidrogênio (através da eletrólise) ou turbinas a gás (queimando o hidrogênio).

Um fator importante que torna o hidrogênio atrativo é o fato de liberar pouco ou nenhum GEE na atmosfera. A questão chave atualmente é como conseguir hidrogênio para ser utilizado em grande escala.

As maneiras de obtenção de hidrogênio mais comuns são:

- Hidrogênio Verde: gerado a partir da eletrólise reversa, utilizando energia elétrica renovável para isto, além de ter como subproduto apenas a água.

- Hidrogênio Cinza e Azul: ambos obtidos a partir da reação a vapor, que inclui a queima de  $\text{CH}_4$  e a obtenção de Hidrogênio e Oxigênio como subprodutos, liberando dióxido de carbono. A diferença entre os dois tipos de hidrogênios é que, no cinza, o  $\text{CO}_2$  é emitido na atmosfera, enquanto no azul, o  $\text{CO}_2$  é capturado e armazenado no solo.

Importante ressaltar, por fim, que o Brasil é um *player* importante no cenário de fornecimento de hidrogênio verde, uma vez que a nossa matriz é majoritariamente renovável, o que possibilita a produção, sendo também possível exportação de hidrogênio verde a países que não possuem esta possibilidade de expansão renovável, devido às suas condições meteorológicas como é o caso da Europa e EUA. Com a expansão das fontes renováveis e até do gás natural, é possível que o hidrogênio verde e cinza/azul ganhe força no país e nos torne um dos principais fornecedores da matéria prima.

O hidrogênio enfrenta várias dificuldades que limitam seu uso como fonte de energia. Primeiramente, o alto preço de produção e armazenamento torna-o economicamente desafiador. Além disso, o hidrogênio é um gás extremamente perigoso, com riscos significativos de explosão e vazamento, exigindo medidas rigorosas de segurança. As tecnologias de transporte e armazenamento de hidrogênio ainda são limitadas, o que dificulta sua ampla adoção e distribuição eficiente.

#### 4.6.3. Smart grids

De acordo com o estudo publicado por Micheletti et al. (2025), a transição para energias renováveis exige *a modernização da rede elétrica para lidar com as intermitências das fontes renováveis, isto é, uma rede capaz de gerenciar a distribuição de energia de forma eficiente e flexível.*

As smart grids, ou redes elétricas inteligentes, são sistemas avançados de distribuição de energia que utilizam tecnologias digitais para monitorar, controlar e gerenciar o fluxo de eletricidade de forma eficiente e confiável. Sensores e medidores inteligentes são dispositivos instalados ao longo da rede que coletam dados em tempo real sobre o consumo e a produção de energia. Esses dados permitem um monitoramento preciso e a identificação de falhas ou perdas na rede.

Os sistemas de comunicação são infraestruturas que facilitam a troca de informações entre os diferentes elementos da rede, assegurando a coordenação e o controle eficientes do

fluxo de energia. Além disso, os sistemas de controle e automação são tecnologias que analisam os dados coletados e executam ações para otimizar a distribuição de energia, equilibrando oferta e demanda e respondendo rapidamente a eventuais interrupções.

As smart grids facilitam a incorporação de energias renováveis, como solar e eólica, na rede elétrica. Isso é crucial, pois essas fontes são intermitentes e a rede precisa ser capaz de gerenciar variações na produção. Ao monitorar e gerenciar o consumo em tempo real, as smart grids ajudam a reduzir perdas e otimizar o uso da energia disponível.

A capacidade de detectar e responder rapidamente a falhas minimiza interrupções no fornecimento e aumenta a resiliência da rede a eventos adversos. Além disso, ao facilitar a integração de fontes renováveis e otimizar o uso de energia, as smart grids contribuem para a redução de emissões de gases de efeito estufa, promovendo uma matriz energética mais sustentável.

#### 4.6.4. Perdas no sistema

As perdas de energia no SIN podem ser classificadas em duas categorias principais: perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas são inerentes ao processo de transmissão e distribuição de energia elétrica e incluem perdas por efeito joule nos condutores, perdas nos núcleos dos transformadores e perdas dielétricas. Conforme mostra a Figura 7, em 2020, as perdas técnicas na distribuição corresponderam a cerca de 38,8 TWh (7,6% do total), enquanto as perdas não técnicas, decorrentes de furtos, fraudes, erros de medição e faturamento foram de aproximadamente 37,9 TWh (7,5% do total).

Figura 7: Perdas sobre a Energia Injetada



Fonte: ANEEL (2020)

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) considera as perdas de energia como um fator importante na projeção e planejamento da expansão do setor elétrico. O PDE inclui estratégias para reduzir essas perdas através de investimentos em tecnologias avançadas e melhorias na infraestrutura. A parcela de “perdas e diferenças” no SIN é calculada a partir da diferença entre o valor da carga global de energia apurada pelo ONS e o valor de consumo na rede obtido pela EPE.

Existem várias soluções sendo implementadas para mitigar as perdas de energia no SIN. A utilização de sistemas avançados de monitoramento e controle, como smart grids, ajuda a identificar e reduzir perdas técnicas e não técnicas. A aplicação de proteções específicas no caso de perdas de sincronismo no SIN (isto é, situações em que uma ou mais unidades geradoras ou áreas do sistema elétrico perdem a capacidade de operar em sincronia com o restante da rede, podendo causar instabilidades graves) ajuda a garantir a operação segura e confiável do sistema. Além disso, melhorias na infraestrutura de transmissão e distribuição, incluindo a modernização de linhas e transformadores, são essenciais para reduzir perdas técnicas.

As perdas de energia no SIN são significativas, representando uma parcela considerável do consumo total de energia (em 2020, aproximadamente 15%). Reduzir essas perdas é crucial para aumentar a eficiência do sistema e garantir um fornecimento de energia mais sustentável e econômico.

#### **4.6.5. Projetos de Captura de Carbono**

Existem diversas tecnologias de captura de carbono sendo estudadas nos dias atuais. Segundo SILVA et al. (2025), existem as tecnologias de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), que visa capturar o CO<sub>2</sub> de processos industriais ou geração de energia e armazená-lo em formações geológicas, de forma permanente; Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), que por sua vez amplia o uso do CCS, utilizando o CO<sub>2</sub> capturado como matéria prima em processos industriais, como a produção de combustíveis sintéticos ou materiais de construção; Captura Direta de Ar (DAC), que visa capturar o CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera usando filtros químicos; e Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono (BECCS), que combina a queima de biomassa para produção energética com a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>.

De acordo com a Revista FAPESP (2024), um projeto de captura de carbono envolve três etapas principais: captura, transporte e armazenamento. Na etapa de captura, o dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>) é capturado indiretamente, através de instalações industriais, usinas movidas a combustíveis fósseis ou usinas geradoras de bioenergia, ou diretamente, através de tecnologias DAC. Após a captura, o CO<sub>2</sub> é comprimido e transportado para o local de uso ou armazenamento. Isso pode ser feito por dutos, navios ou caminhões. Finalmente, o CO<sub>2</sub> não utilizado é injetado em formações geológicas subterrâneas, como aquíferos salinos ou campos de petróleo esgotados, onde é armazenado de forma segura e permanente. Entre os projetos mais promissores para a transição energética no Brasil, destacam-se a Bioenergia com Captura e Armazenamento de Carbono e as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono. A BECCS é especialmente relevante por combinar a geração de energia renovável da biomassa com a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera, resultando em emissões negativas. Dada a ampla produção nacional de etanol e o uso intensivo de biomassa, essa tecnologia encontra terreno fértil para expansão no país. Já o CCUS se mostra estratégico devido à expressiva presença de plantas industriais e operações offshore, como plataformas e navios petroleiros, que oferecem oportunidades para captura e reinjeção de carbono em escala.

Os custos associados a projetos de captura de carbono variam conforme a tecnologia empregada e a escala de operação. Em geral, os custos tendem a ser elevados devido à complexidade dos processos envolvidos, como separação química, compressão e armazenamento de CO<sub>2</sub>. No entanto, tecnologias como CCUS e BECCS podem apresentar custos mais competitivos no contexto brasileiro, especialmente pela ampla disponibilidade de biomassa e pela presença significativa de infraestrutura industrial e petrolífera, conforme mencionado. Ainda assim, os valores podem oscilar consideravelmente dependendo da escala e localização.

## 5. DISCUSSÕES

Uma vez realizada a leitura e análise dos resultados dos artigos que compuseram a amostra final deste estudo, foi possível observar que o futuro da transição energética pode ser associado a diversos caminhos e soluções, a depender da sua localidade, disponibilidade financeira para investimentos, condições climáticas locais e atuais fontes de energia utilizadas.

Para uma melhor discussão acerca das informações encontradas, os resultados coletados foram agrupados por similaridade e delimitados por categoria: (5.1) *Fatores*

*históricos e contexto global de tecnologias para a transição energética e (5.2) Fatores associados ao futuro da transição energética, com ênfase no cenário brasileiro.*

### **5.1. Fatores históricos e cenário atual da geração de energia**

A intensificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) desde a Primeira Revolução Industrial está intrinsecamente ligada ao modelo de desenvolvimento adotado globalmente, baseado na queima de combustíveis fósseis e na exploração intensiva de recursos naturais. Esse modelo, embora tenha impulsionado o crescimento econômico e o avanço tecnológico, também gerou desequilíbrios ambientais significativos, culminando em mudanças climáticas com impactos cada vez mais evidentes e severos.

Em resposta a esse cenário, a comunidade internacional tem buscado estabelecer compromissos multilaterais para conter o avanço das emissões. Acordos como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris representam marcos importantes na tentativa de alinhar os interesses econômicos com a urgência ambiental. Nesse contexto, a transição energética se apresenta como um dos pilares centrais para alcançar as metas de descarbonização, sendo as fontes renováveis de energia o principal vetor dessa transformação.

Contudo, é necessário reconhecer que a adoção de fontes renováveis não está isenta de desafios. A energia solar e eólica, por exemplo, são intermitentes e exigem sistemas de armazenamento ou fontes complementares para garantir a estabilidade da rede elétrica. A biomassa, embora renovável, pode gerar conflitos com o uso da terra e emissões secundárias. Além disso, a produção e o descarte de equipamentos utilizados nessas tecnologias também geram impactos ambientais que precisam ser considerados em uma análise de ciclo de vida.

O gás natural, frequentemente apontado como o “combustível da transição”, possui menor intensidade de carbono em comparação com o carvão e o petróleo. No entanto, trata-se de uma fonte não renovável e emissora de metano, um GEE com potencial de aquecimento global significativamente superior ao dióxido de carbono. Assim, seu uso deve ser estrategicamente limitado ao curto prazo, como uma ponte para tecnologias mais limpas e sustentáveis. Além disso, de acordo com o exposto por Lewenkopf (2021), a estruturação de uma infraestrutura para o caminho do gás natural no Brasil torna-se imprescindível para garantir a segurança em seu uso.

A energia nuclear, por sua vez, representa uma alternativa de alta densidade energética e baixa emissão de carbono. Países que buscam segurança energética e metas climáticas

ambiciosas têm considerado essa fonte como parte de suas estratégias de longo prazo. No entanto, os riscos associados a acidentes, o alto custo de implantação e a complexidade do gerenciamento de resíduos radioativos ainda geram resistência social e política. A adoção dessa tecnologia exige, portanto, um planejamento rigoroso, com ênfase em segurança, transparência e aceitação pública.

## **5.2. Fatores associados ao futuro da transição energética, com ênfase no cenário brasileiro.**

O Brasil ocupa uma posição singular no cenário energético global. Com uma matriz elétrica composta majoritariamente por fontes renováveis — especialmente a energia hidrelétrica — o país já faz parte de uma base relativamente limpa em comparação com outras nações. No entanto, essa vantagem estrutural não elimina os desafios internos, que são de natureza distinta e igualmente complexa.

A principal limitação está na dimensão territorial do país, que impõe dificuldades logísticas para a interligação eficiente das linhas de transmissão. Regiões distantes dos grandes centros de geração enfrentam riscos de desabastecimento, especialmente em situações de escassez hídrica ou falhas técnicas. A dependência do Sistema Interligado Nacional (SIN) em relação às hidrelétricas, embora historicamente vantajosa, torna-se um ponto de vulnerabilidade diante das mudanças no regime de chuvas e da crescente variabilidade climática.

Além disso, o acionamento de usinas termelétricas em momentos de emergência compromete os ganhos ambientais da matriz brasileira, além de elevar os custos operacionais e as emissões. Nesse sentido, torna-se urgente diversificar as fontes de geração e investir em soluções que garantam flexibilidade, confiabilidade e sustentabilidade ao sistema.

Entre as alternativas mais promissoras estão as baterias de grande escala, capazes de armazenar energia em períodos de baixa demanda e liberá-la em momentos críticos; o hidrogênio verde, com potencial para substituir combustíveis fósseis em setores difíceis de descarbonizar; e os projetos de captura e armazenamento de carbono (CCUS), que podem mitigar emissões residuais de fontes inevitáveis, especialmente aquelas associadas ao uso de combustíveis fósseis.

Um ponto importante a ser comentado é o exposto por Riedel (2019) em suas análises. A escolha de utilizar baterias ou hidrogênio como tecnologia de armazenamento estratégico depende diretamente do objetivo e do contexto de aplicação. Para usos cotidianos que

demandam menor volume de energia armazenada, as baterias demonstram maior viabilidade técnica e econômica do que o hidrogênio. Por outro lado, em cenários que exigem maior capacidade de armazenamento ou autonomia prolongada, o hidrogênio pode se apresentar como uma solução mais eficaz, especialmente por sua densidade energética e potencial de integração em sistemas de larga escala.

A implementação de redes inteligentes (smart grids) é outro elemento-chave para o futuro energético do país. Essas redes permitem o monitoramento em tempo real da geração, distribuição e consumo de energia, otimizando o uso dos recursos disponíveis e facilitando a integração de fontes intermitentes, conforme apresentado por Micheletti et al. (2025). Quando associadas ao SIN, essas tecnologias possibilitam uma gestão mais eficiente e resiliente, com capacidade de resposta rápida a eventos climáticos extremos ou falhas operacionais.

A interligação dessas soluções representa uma estratégia robusta para reduzir a dependência das usinas termelétricas como fonte de backup. Ao fortalecer a infraestrutura energética com tecnologias limpas, inteligentes e descentralizadas, o Brasil pode consolidar sua liderança na transição energética global, garantindo segurança energética, competitividade econômica e responsabilidade ambiental.

## **6. CONCLUSÃO**

As tecnologias exploradas para a transição energética demonstram que o futuro dessa transição reside na diversificação da matriz elétrica. O aumento das fontes renováveis, como solar e eólica, é essencial, mas deve ser acompanhado pelo desenvolvimento e implementação de tecnologias que garantam a segurança e a estabilidade dessas fontes intermitentes. Investimentos em armazenamento de energia, como baterias de alta capacidade, hidrogênio verde e hidrelétricas reversíveis, são cruciais para superar os desafios da intermitência e assegurar um fornecimento contínuo de energia. Além disso, a implementação de smart grids (redes elétricas inteligentes) é fundamental para otimizar a distribuição e o gerenciamento da energia, melhorando a eficiência e a resiliência do sistema elétrico.

A adaptação das fontes fósseis poluentes é também importante. A utilização conjunta de projetos de captura de carbono, hidrogênio e energia nuclear pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa ao utilizar estas fontes. Portanto, a combinação dessas tecnologias e a integração de soluções inovadoras são fundamentais para alcançar uma matriz energética diversificada, sustentável e resiliente no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCD ENERGIA - EPE. Fontes de Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 04 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 04 maio 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Regiões Hidrográficas. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/regioes-hidrograficas>. Acesso em: 18 ago. 2025.

BRASIL ESCOLA. Acordo de Paris. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/acordo-paris.htm>. Acesso em: 04 maio 2025.

Ecycle. Cores do hidrogênio: conheça os tipos e suas aplicações. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/cores-do-hidrogenio/>. Acesso em: 31 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) e sua importância para a transição energética no Brasil. Nota Técnica EPE-DEE-NT-098/2019. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098\\_2019\\_Baterias%20no%20planejamento.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf). Acesso em: 31 ago. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica - Dados de entrada para modelos elétricos e energéticos: metodologias e premissas – Versão R3. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-dados-de-entrada-para-modelos-eletricos-e-energeticos-metodologias-e-premissas-versao-r3>. Acesso em: 31 ago. 2025.

EPE. PDE 2031 Revisão. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes/pde-2031-revisao>. Acesso em: 04 maio 2025.

EPE. Planejamento energético e a EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/planejamento-energetico-e-a-epe#:~:text=O%20PDE%20%C3%A9%20o%20Plano,como%20Plano%20de%20Longo%20Prazo>. Acesso em: 04 maio 2025.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia>. Acesso em: 04 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE).

Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 04 maio 2025.

EPE. Publicações. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes>. Acesso em: 04 maio 2025.

FERREIRA, Thiago Vasconcellos Barral; MACHADO, Giovani Vitória. O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor. Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v27i2.635>

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física – Volume 3: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. ISBN 978-85-216-3208-5

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) e sua importância para a transição energética no Brasil. Rio de Janeiro: IBP, 2023. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2023/01/artigo-abc-ccus.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2025

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Electricity 2025: Analysis and forecast to 2027. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>. Acesso em: 30 ago 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy Review 2025. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>. Acesso em: 30 ago 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Major growth of clean energy limited the rise in global emissions in 2023. Disponível em: [https://www-iea-org.translate.goog/news/major-growth-of-clean-energy-limited-the-rise-in-global-emissions-in-2023?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=wa](https://www-iea-org.translate.goog/news/major-growth-of-clean-energy-limited-the-rise-in-global-emissions-in-2023?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=wa). Acesso em: 04 maio 2025.

LEWENKOPF, Marcos Araújo. O papel do gás natural na transição energética: um foco no caso brasileiro. 2021. Monografia – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21442/1/MALewenkopf.pdf>

MICHELETTI, Danilo Hungaro et al. A transição para energias renováveis: impactos econômicos e ambientais da implementação de tecnologias sustentáveis. IOSR Journal of Business and Management, v. 27, n. 1, p. 13–24, jan. 2025. DOI: 10.9790/487X-2701021324

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Conheça as instituições do setor elétrico brasileiro e as competências de cada uma. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-as-instituicoes-do-setor-eletrico-brasileiro-e-as-competencias-de-cada-uma>. Acesso em: 04 maio 2025.

MUNDO EDUCAÇÃO. Revolução Industrial. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/historiageral/revolucao-industrial-2.htm>. Acesso em: 04 maio 2025.

REVISTA ARACÊ. São José dos Pinhais, v.7, n.3, p.11340-11363, 2025.

RIEDEL, Vitor Feitosa. Análise técnica de um sistema de armazenamento de energia elétrica produzida por fontes renováveis utilizando sistemas de baterias e células a combustível a hidrogênio. 2019. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas. Disponível em:

<https://unicamp.br/unicamp/teses/2019/08/26/analise-tecnica-de-um-sistema-de-armazenamento-de-energia-eletrica-produzida-por>

SILVA, João, et al. Educação Ambiental na Escola Pública. Caderno Pedagógico, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 45–60, 2025. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/16041/8947>. Acesso em: 01 out. 2025.

UN. Stockholm to Kyoto: A Brief History of Climate Change. Disponível em: [https://www-un-org.translate.goog/en/chronicle/article/stockholm-kyoto-brief-history-climate-change?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www-un-org.translate.goog/en/chronicle/article/stockholm-kyoto-brief-history-climate-change?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc). Acesso em: 04 maio 2025.

UOL NOTÍCIAS. 12/03/1999: Blecaute deixa dez Estados e o DF sem luz e afeta 76 milhões. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/1999/03/12/blecaute-deixa-dez-estados-e-o-df-sem-luz-e-afeta-76-milhoes.htm>. Acesso em: 04 maio 2025.

ZAPAROLLI, Domingos. Remover carbono da atmosfera pode ajudar a conter o aquecimento global. Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, jun. 2024. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/remover-carbono-da-atmosfera-pode-ajudar-a-conter-o-aquecimento-global/>. Acesso em: 01 out. 2025.